

ANALÝZA INTERAKCE KAMENIVO-TRHLINA Z HLEDISKA LOMOVÝCH CHARAKTERISTIK BETONU FRACTURE CHARACTERISTICS OF CONCRETE: ANALYSIS OF AGGREGATE-CRACK INTERACTION

ZBYNĚK KERŠNER,
LUBOŠ NÁHLÍK, ZDENĚK KNĚSL

Lomová houževnatost betonu, vlastnosti zatvrdlé cementové pasty a kameniva. Interakce mezi trhlinou a zrnem kameniva, lineární elastická lomová mechanika. Kritická napětí pro zastavení trhliny na povrchu zrna kameniva.

Fracture toughness of concrete, properties of hardened cement paste and aggregates. Interaction between crack and particle of aggregate, linear elastic fracture mechanics. The critical stress for stop of crack propagation on aggregate surface.

Šíření trhlin s použitím metod lomové mechaniky je v oblasti stavebních materiálů a konstrukcí vyšetřováno také na silikátových kompozitech – betonu, maltě, zatvrdlé cementové pastě [1]. Lomová mechanika představuje značný přínos pro vývoj těchto kompozitů, zlepšení určitých vlastností, sledování vztahů mezi lomovými a mikrostrukturními parametry, vysvětlení či potlačení anomálií v chování zkušebních vzorků nebo konstrukcí během jejich zrání a stárnutí i s ohledem na jejich trvanlivost apod. [2 až 5].

Ke stanovení lomových charakteristik zmíněných cementových kompozitů slouží zkouška trámčů s centrálním zářezem v tažených vláknech třibodovým ohybem

(3BO). Zaznamenává se závislost zatížení a průhybu uprostřed rozpětí, přičemž zatěžování se provádí přírůstkem deformace. Typickými výstupy jsou efektivní délka trhliny (resp. její přírůstek), efektivní lomová houževnatost, efektivní hnací síla trhliny, specifická lomová energie a charakteristická délka kompozitu.

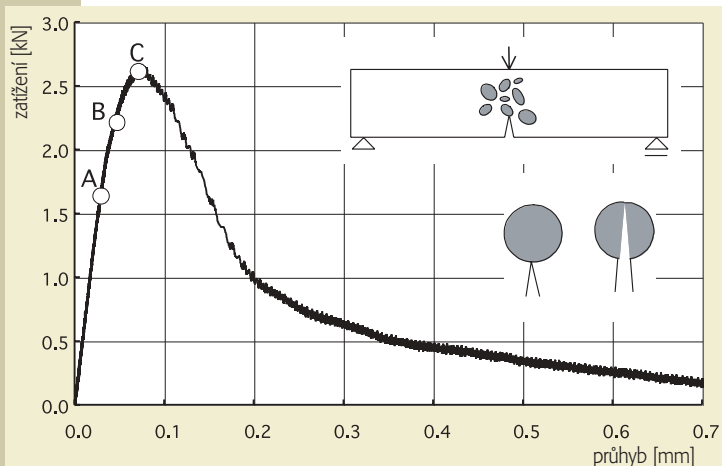
Lomová houževnatost kompozitu závisí na vlastnostech jeho složek, tj. zatvrdlé cementové pasty a kameniva, uspořádání zrn kameniva, jejich velikosti, křivce zrnitosti apod. Na základě modelů [6, 7] lze usuzovat na mechanismy, které přispívají ke zvýšení houževnatosti kompozitu, např. proces mikropraskání, vychylování trhliny z jejího původního směru vlivem zrna kameniva, přemostování a zachycení trhliny [8]. Identifikace se provádí na základě poměrů lomové houževnatosti betonu a zatvrdlé cementové pasty s odpovídajícím vodním součinitelem.

Příklad experimentálně získané závislosti zatížení-průhyb (příp. napětí-poměrné přetvoření) uvádí obr. 1. Diagram lze rozdělit na čtyři oblasti [9]. První až po bod A je prakticky lineární a v tomto případě je růst pórů/defektů s růstem zatížení zanedbatelný. Druhá od bodu A po bod B je charakterizována vznikem mikrotrhlin z existujících pórů, které se s růstem namáhání zvětšují. Tyto mikrotrhliny jsou vzájemně izolované a v objemu vzorku jsou rozloženy náhodně. Rozdělení napě-

tí uvnitř vzorku je však stále ještě homogenní. Třetí stadium mezi body B a C je charakterizováno spojováním mikrotrhlin a vznikem makrotrhliny, která se s rostoucím napětím začne šířit. Toto stadium bývá označováno jako lokalizace poškození nebo lokalizace deformace. V okolí vrcholu makrotrhliny se vytváří tzv. lomová procesní zóna, která rozhoduje o jejím dalším chování. Během tohoto procesu již rozložení napětí ve vzorku není homogenní. Délka trhliny odpovídající maximálnímu zatížení/namáhání (bod C na obr. 1) se nazývá též kritická délka trhliny. V posledním stadiu makrotrhlina roste až k bodu konečného rozlomení vzorku, i když celkové namáhání klesá. Rozdělení deformace a poškození ve vzorku je nehomogenní. Na základě těchto úvah lze konstatovat, že lom betonu je charakterizován lokalizací deformace, kterou lze modelovat makrotrhlinou a popsat prostředky lomové mechaniky.

V příspěvku je beton modelován jako dvoufázové kontinuum (obdobně jako v [10]) a pozornost je zaměřena na interakci mezi trhlinou a zrnem kameniva – viz obr. 1. Konfigurace, kdy se vrchol makrotrhliny nachází v těsné blízkosti zrna kameniva, případně kdy její vrchol leží na rozhraní kamenivo/zatvrdlá cementová pasta, může výrazně ovlivnit chování makrotrhliny zejména v oblasti zkoušky odpovídající třetímu stadiu závislosti zatížení-průhyb (tj. oblast mezi body B a C na obr. 1).

Cílem příspěvku je popsat vliv interakce trhliny s kamenivem na výsledné hodnoty efektivní lomové houževnatosti betonu a to v závislosti především na materiálových charakteristikách zatvrdlé cementové pasty a kameniva. Vzhledem k velkému rozptylu odpovídajících materiálových dat jsou výpočty provedeny pro široké spektrum možných hodnot jak zatvrdlé cementové pasty, tak i kameniva. Speciální pozornost je věnována případu, kdy makrotrhlina prochází kamenivem. Aktuálnost zkoumané problematiky ukazuje např. [11], kde je experimentálně studováno zvyšování houževnatosti cementových



Obr. 1 Diagram zatížení-průhyb při 3BO betonového trámce se zářezem a studované situace

Fig. 1 Load-deflection diagram by three-point bending of notched concrete specimen / Studied interactions

kompozitů s ohledem na ne/pravidelný tvar zrna kameniva a jeho soudržnost s matricí, přičemž jsou jako srovnávací použity kompozity, cementová pasta s částicemi – ocelovými/skleněnými kuličkami. Obr. 2. ilustruje reálnou situaci v lomových plochách betonu (bez drobné frakce kameniva) trámce se zářezem po zkoušce 3BO. Na obrázku jsou dobře patrné přetržené částice, i zrna z matrice vytažená.

ŠÍŘENÍ TRHLINY V BETONU – MODEL DVOUFÁZOVÉHO KONTINUA

Beton je modelován jako dvoufázové kontinuum. První fáze (matrice) je tvořena zatvrdlou cementovou pastou, druhá fáze (částice) je tvořena kamenivem. Předpokládáme, že obě fáze jsou homogenní a izotropní a lze je charakterizovat elastickými konstantami (Youngův modul a Poissonovo číslo) a odpovídající hodnotou lomové houževnatosti. Rozhraní mezi matricí a částicemi je modelováno jako hranice, kde se mění elastické konstanty a hodnota lomové houževnatosti skokem, přičemž složky posunutí přecházejí z jednoho prostředí do druhého spojitě (hranice s ideální adhezí). Pro výpočet MKP je použit model rovinné deformace a částice jsou modelovány jako kruhové oblasti.

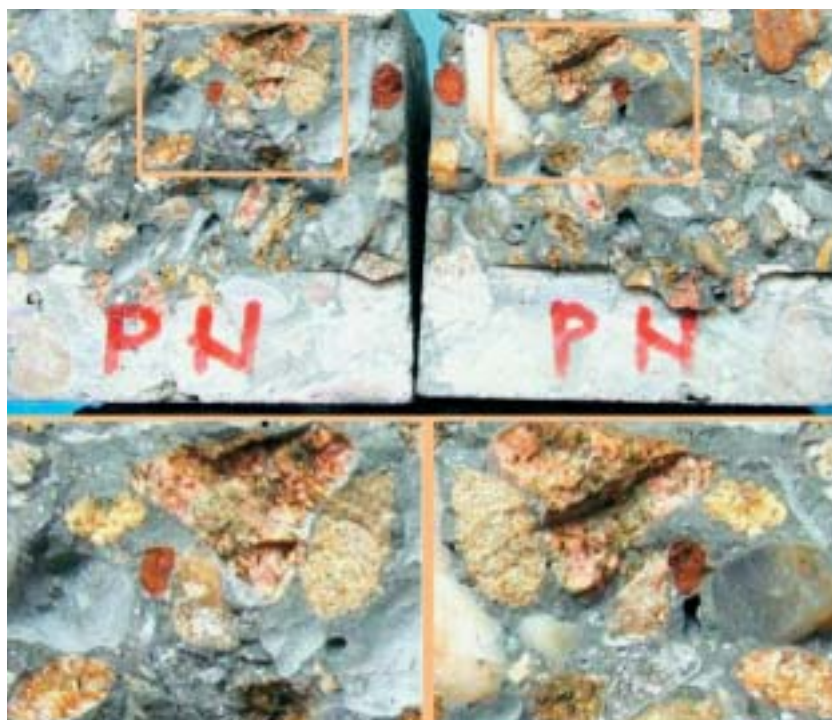
V případě trhliny šířící se dvoufázovým prostředím mohou nastat dva základní případy. První odpovídá trhlíně, jejíž vrchol se nachází v matrici v určité vzdálenosti od částice. Chování trhliny může být ovlivněno lokální koncentrací napětí existující v matrici, která je vyvolaná existencí částice. Pro popis chování trhliny lze použít klasický přístup lomové mechaniky. Podstatně komplikovanější je případ trhliny s vrcholem na rozhraní matrice/částice (obr. 1).

KRITERIUM STABILITY PRO TRHLINU S VRCHOLEM NA ROZHRANÍ DVOU MATERIÁLŮ

V případě trhliny v homogenním prostředí má rozložení napětí vzhledem ke vzdálenosti od vrcholu trhliny r singulární charakter typu $r^{-1/2}$. Exponent singularity napětí je roven $1/2$, rozměr faktoru intenzity napětí K_I je $\text{MPa m}^{1/2}$. Kritická veličina faktoru intenzity napětí je lomová houževnatost, K_{Ic} , a kritérium stability má tvar (1).

$$K_I (\text{délka trhliny, zatížení}) < K_{Ic} \quad (1)$$

V případě trhliny s vrcholem na rozhraní již pro rozdělení napětí takové vztahy neplatí a dochází ke změně charakteru



Obr. 2 Zlomky trámce se zářezem po zkoušce třibodovým ohybem (detail dole) – zrna kameniva přelomená i vytažená ze zatvrdlé cementové pasty

Fig. 2 Parts of specimen after three-point bending test (below in detail) – fracture/pull out of aggregates

singularity. Rozdělení napětí je typu $r^{-\lambda}$, kde $0 < \lambda < 1$ je exponent singularity, jehož hodnota závisí na materiálových konstantách obou materiálů [10]. Podobně jako faktor intenzity napětí K_I je zde definován zobecněný faktor intenzity napětí H_I , který je funkcí materiálových parametrů, aplikovaného napětí, geometrie tělesa a okrajových podmínek a jeho hodnota musí být určena numericky.

Skutečnost, že hodnota exponentu singularity $\lambda \neq 1/2$ znamená, že pro studium takových trhlin nelze použít přístupy klasické lomové mechaniky [12] a zejména kritérium stability (1) musí být modifikováno. Podmínka stability trhliny je pro tyto případy formulována pomocí střední hodnoty normálového napětí vypočteného v oblasti před jejím vrcholem [13]. Tato hodnota je porovnána s kritickým lomovým napětím, které je materiálovou konstantou a může být vyjádřeno pomocí odpovídající hodnoty lomové houževnatosti K_{Ic} . Je tedy možno vypočítat kritické aplikované napětí $\sigma_{a,crit}$ nutné k tomu, aby se trhlina šířila přes rozhraní – viz [10].

$$\sigma_{a,crit} = \frac{K_{Ic}}{H_I(1\text{MPa})} \frac{2D^{\lambda-1/2}}{(2-\lambda+g_r)} \quad (2)$$

Ve vztahu (2) je D velikost částice, H_I (1 MPa) numericky (MKP) určená hod-

nota zobecněného faktoru intenzity napětí pro vnější zatížení 1 MPa, g_r označuje známou funkci materiálových parametrů.

VÝPOČTOVÝ MODEL

V rámci lineární elastické lomové mechaniky je tedy naším cílem vyjádření aplikovaného napětí (2), které je dostačující pro průchod trhliny rozhraním mezi matricí a částicí. Fyzikální význam mají dvě konfigurace (obr. 1). V prvním případě se jedná o trhlinu, která se šíří v matrici a nachází se na jejím rozhraní s částicí, druhý případ odpovídá situaci, kdy trhlina prošla částicí, došlo k rozlomení částice a trhlina se nachází na rozhraní částice/matrice. Částice je modelována jako kruhová inkluze o průměru D (obr. 3), je uvažována rovnost Poissonových čísel obou fází kompozitu. Nestuduje se šíření trhliny podél rozhraní. Pro zjednodušení dále předpokládáme, že můžeme zanedbat interakci vrcholu trhliny s ostatními částicemi. Tento předpoklad je oprávněný, uvážíme-li singulární průběh napětí v okolí vrcholu trhliny a skutečnost, že hustota částic je dostatečně malá. Dle uvedených předpokladů a zjednodušení lze pro výpočet kritického napětí v obou uvedených případech zvolit model trhliny s vrcholem na rozhraní matrice/částice, resp. částice/matrice,

kteřá je namáhána normálovým napětím σ_{appl} (obr. 1, 3). V případě zkoušky trámce tříbodovým ohybem předpokládáme, že trhlinka se šíří z centrálního zářezu.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Cílem příspěvku bylo popsat vliv interakce trhliny s kamenivem na výsledné hod-

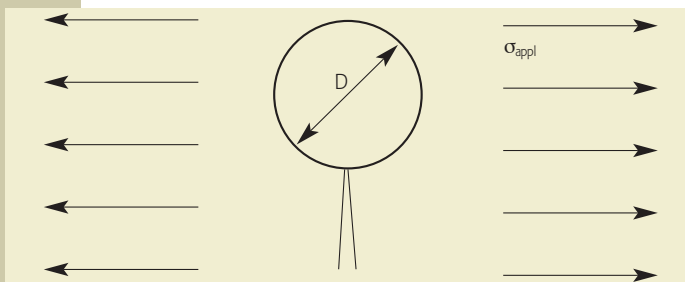
noty lomové houževnatosti betonu, a to v závislosti především na materiálových charakteristikách zatvrdlé cementové pasty a kameniva – viz. tab. 1. Z tohoto hlediska je rozhodující konfigurace, při níž se makrotrhlinka zastaví při svém šíření na rozhraní zatvrdlá cementová pasta – kamenivo a následný průchod kameni-

vem včetně situace, kdy se vrchol trhliny nachází na rozhraní kamenivo – zatvrdlá cementová pasta (obr. 1). V obou případech dochází v důsledku skokové změny materiálových parametrů (včetně hodnot lomové houževnatosti) i ke změně v chování trhliny. V závislosti na relaci mezi těmito parametry v obou prostředích (pasta, kamenivo), může dojít k zastavení šíření trhliny na rozhraní pasta – kamenivo (případně kamenivo – pasta) a tedy ke skokovému nárůstu vnějšího zatížení v diagramu zatížení průhyb, případně (v opačném případě poměrů materiálových parametrů) k náhlému poklesu vnějšího zatížení vyvolaného skokovým průchodem makrotrhliny částicí. V případě chybné interpretace tohoto jevu mohou oba tyto případy ovlivnit výslednou hodnotu měřené lomové houževnatosti. S cílem přispět k objasnění jevu, jsou v příspěvku obě konfigurace analyzovány pomocí obecného lomově-mechanického modelu popisujícího chování trhliny s vrcholem na rozhraní dvou různých elastických materiálů a jsou vypočteny hodnoty kritického vnějšího aplikovaného napětí, které je zapotřebí k průchodu makrotrhliny rozhraním částice.

Výsledkem aplikace tohoto postupu jsou kritické hodnoty vnějšího aplikovaného napětí σ_{crit} , které závisejí na materiálových parametrech obou složek betonu, na velikosti částic kameniva a na lomové houževnatosti materiálu, do kterého se bude trhlinka dále šířit.

Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 2 a 3 a na obr. 4 a 5, kde lze nalézt rovněž hodnotu zobecněného faktoru intenzity napětí H_I . Vzhledem k rozptylu materiálových parametrů obou prostředí, a v důsledku toho i možného rozptylu hodnot kritického napětí, jsou v tabulkách vždy uvedeny možné minimální a maximální hodnoty. Všechny údaje uvedené v tab. 2 až 4 a na obr. 4 a 5 jsou vypočteny pro vnější aplikované napětí $\sigma_{appl} = 3$ MPa. Poznamenejme však, že v důsledku linearitě problému lze tyto výsledky snadno přepočítat a použít i pro jinou úroveň zatěžování. Je patrný značný rozdíl v hodnotách kritického napětí pro různé materiály zma kameniva.

Pro srovnání uveďme také minimální (maximální) kritické napětí pro případy, kdy je matrice i částice tvořena zatvrdlou cementovou pastou: pro rozhraní matrice/částice je to 0,23 (1,86) MPa pro částici s $D = 8$ mm (trhlinka délky 25 mm)



Obr. 3 Model částice kameniva
Fig. 3 Particle/aggregate model

Tab. 1 Modul pružnosti a lomová houževnatost uvažovaných částic a matrice
Tab. 1 Modulus of elasticity and fracture toughness for material of aggregate/matrix

Materiál	E [GPa]	K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]
Částice pískovec	20	0,28 – 0,52
žula	50	1,8 – 6,3
čedič	60	1,8 – 6,35
Matrice zatvrdlá cementová pasta	25 – 45 ^{a)}	0,1 – 0,8

^{a)} Hodnoty E pro matrici jsou uvažovány pro výpočet parametricky 20, 30 a 40 GPa.

Částice	$E_{matrice} / E_{částice}$	$D = 8$ mm			$D = 16$ mm		
		H_I [MPa.m ^{1/2}]	$\sigma_{crit,min}$ [MPa]	$\sigma_{crit,max}$ [MPa]	H_I [MPa.m ^{1/2}]	$\sigma_{crit,min}$ [MPa]	$\sigma_{crit,max}$ [MPa]
pískovec	2/2	1,289	0,65	1,21	1,082	0,78	1,44
	3/2	1,187	0,57	1,06	1,033	0,68	1,26
	4/2	1,105	0,52	0,97	0,988	0,62	1,14
žula	2/5	1,457	5,48	19,09	1,144	6,58	23,04
	3/5	1,393	4,90	17,13	1,124	5,86	20,52
	4/5	1,338	4,49	15,72	1,103	5,36	18,77
čedič	2/6	1,480	5,75	20,28	1,150	6,90	24,36
	3/6	1,424	5,16	18,20	1,134	6,19	21,82
	4/6	1,374	4,75	16,74	1,117	5,68	20,03

Tab. 2 Kritické napětí – rozhraní matrice/částice kameniva
Tab. 2 Critical stress – matrix/particle interface

Tab. 3 Kritické napětí – rozhraní částice kameniva/matrice
Tab. 3 Critical stress – particle/matrix interface

částice	$E_{matrice} / E_{částice}$	$D = 8$ mm			$D = 16$ mm		
		H_I [MPa.m ^{1/2}]	$\sigma_{crit,min}$ [MPa]	$\sigma_{crit,max}$ [MPa]	H_I [MPa.m ^{1/2}]	$\sigma_{crit,min}$ [MPa]	$\sigma_{crit,max}$ [MPa]
pískovec	2/2	1,725	0,17	1,36	2,020	0,15	1,20
	3/2	1,666	0,22	1,76	1,887	0,19	1,52
	4/2	1,615	0,25	2,00	1,784	0,22	1,76
žula	2/5	1,746	0,10	0,80	2,164	0,09	0,71
	3/5	1,761	0,13	1,04	2,135	0,11	0,89
	4/5	1,748	0,15	1,20	2,079	0,13	1,05
čedič	2/6	1,726	0,09	0,72	2,157	0,08	0,65
	3/6	1,759	0,12	0,96	2,156	0,10	0,80
	4/6	1,758	0,14	1,12	2,118	0,12	0,95

a 0,28 (2,22) MPa pro částici s $D = 16$ mm (trhlna délky 21 mm); pro rozhraní částice/matrice pak 0,17 (1,39) MPa pro $D = 8$ mm (trhlna 33 mm) a 0,15 (1,19) MPa pro $D = 16$ mm (trhlna 37 mm).

ZÁVĚR

Jsou uvedeny výsledky analýzy lomového chování betonu, modelovaného jako dvoufázové prostředí sestávající ze zatvrdlé cementové pasty (matrice) a kameniva (částice). Navržený model umožňuje popsat lomové chování makrotrhliny šířící se v tomto prostředí a pro reálná materiálová data jsou presentovány příslušné výpočty.

Z výsledků lze usoudit, že v případě, kdy se trhlna blíží kamenivu, anebo se zastaví na rozhraní zatvrdlá cementová pasta/kamenivo (případně po průchodu kamenivem na rozhraní kamenivo/zatvrdlá cementová pasta), může dojít ke zdánlivému zvýšení (případně snížení) měřené hodnoty lomové houževnatosti. Tento jev může přispět k objasnění rozptylu v publikovaných hodnotách lomové houževnatosti betonu. Vzhledem k tomu, že naměřená hodnota efektivní lomové houževnatosti betonu je úměrná vypočtenému kritickému napětí σ_{crit} , lze tento jev i kvantifikovat. Navržený model se uplatní zejména v případě pevné vazby mezi povrchem zrna kameniva a zatvrdlou cementovou pastou, např. u drceného kameniva. Presentované výsledky lze dále využít při návrhu typu a velikosti kameniva do betonu s požadovanými vlastnostmi.

Příspěvek vznikl s podporou projektu GA ČR 106/01/0381 a výzkumného záměru CEZ: J22/98: 261100009.

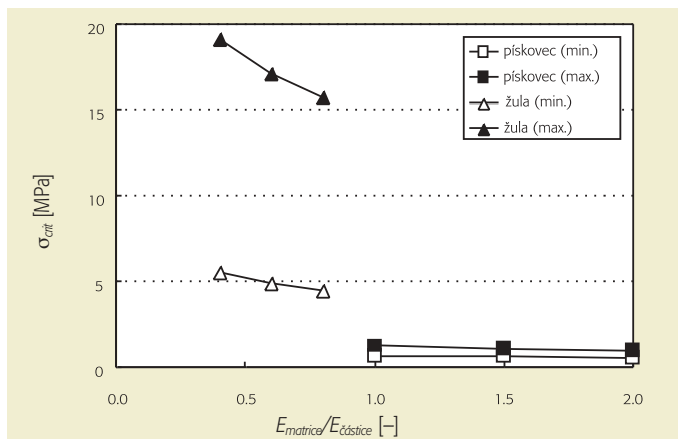
Literatura:

- [1] Karihaloo B. L.: Fracture mechanics of concrete. Longman Scientific & Technical, New York, 1995
- [2] Keršner Z., Bílek V., Schmid P.: Fracture mechanics study of two aspects reducing mechanical characteristics of concrete Acta Polytechnica, Praha, Vol. 39, 2/1999, 25–38.
- [3] Bílek V.: Role of admixtures in degradation of fracture properties of concrete Proc. CANMET/ACI conference Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Nice, 2000, 153–167
- [4] Bílek V. and others: Development of fracture characteristics of hardened cement pastes and causes of microcracking. FRAMCOS-4, Cachan, 2001, 177–181, ISBN 90-2651-825-0
- [5] Bílek V. a kol.: ...a nejlepší je beton, který zmrzne. Sb. konf. Betonářské dny 2001, Pardubice, 2001, 228–233, ISBN 80-238-7595-7
- [6] Lange-Kombak D., Karihaloo B. L.: Design of concrete mixes for minimum brittleness, Adv. Cement Based Materials, No. 3, 1996, 124–132
- [7] Li V. C., Huang J.: Relation of concrete fracture toughness to its internal structure, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1/2/3, 1990, 39–46
- [8] Keršner Z., Bílek V.: Influence of microstructure on toughening mechanisms of concretes. Eng. Mech., Vol. 5, 1998, No. 3, 199–201
- [9] Shah S. P., Ouyang C.: Fracture mechanics for failure of concrete, Annu. Rev. Mat. Sci. 24, 1994, 293–320
- [10] Kněsl Z., Náhlík L., Keršner Z.: Calculation of the critical stress in two-phase materials, Proc. Structural Engineering, Mechanics and Computation SEMC 2001, Cape Town, 2001, 737–744, ISBN 0-08-043948-9
- [11] Merchant I. J., and others: Toughening cement-based materials through the control of interfacial bonding, Cement and Concrete Research 31, 2001, 1873–1880
- [12] Lipetzky P., Kněsl Z.: Crack-particle interaction in a two-phase composite. Part II: crack deflection Inter. Journal of Fracture 73:1, 1995, 81–92
- [13] Kněsl Z., Knápek A., Bednář K.: Evaluation of the critical stress in bonded materials with a crack perpendicular to the interface in: Surface Modification Technologies XI. Eds/: T.S. Sudarshan, M. Jeandin and K.A. Khor, The Institute of Metals, London, 1998, 153–159

Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
ÚSM FAST VUT v Brně
Veveří 95, 662 37 Brno
e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz

Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.
e-mail: nahlik@ipm.cz
Prof. RNDr. Zdeněk Kněsl, CSc.
e-mail: knesl@ipm.cz
oba: ÚFM AV ČR
Žižkova 22, 616 62 Brno

Obr. 4 Kritické napětí – rozhraní matrice/částice kameniva (8 mm)
Fig. 4 Critical stress – matrix/particle (8 mm size) interface



Obr. 5 Kritické napětí – rozhraní částice kameniva (8 mm)/matrice
Fig. 5 Critical stress – particle (8 mm size)/matrix interface

